Chapitre 11: Réactions nucléaires, radioactivité et fission

1. Définitions

a) Nucléides (= noyaux atomiques)

Les nucléides renferment les nucléons: les protons (portant une charge élémentaire positive e) et les neutrons (charge nulle).

Symbole : $^{A}_{Z}X$

A est le nombre de masse et représente le nombre de nucléons.
Z est le nombre atomique et représente le nombre de charges positives élémentaires ou le nombre de protons.
N est le nombre de neutrons.

On a : $N = A - Z$

Exemples :

$^{4}_{2}He$ renferme 4 nucléons : 2 protons et 4 – 2 = 2 neutrons.
$^{238}_{92}U$ renferme 92 protons et 238 – 92 = 146 neutrons.

	Neutron	**Proton**	**Electron**
Charge (C)	0	$e = 1,60\ 10^{-19}$	-e
Masse (kg)	$1,674 \cdot 10^{-27}$	$1,672 \cdot 10^{-27}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Masse (en u)	1,008 665	1,007 277	0,000 549
Energie au repos (MeV)	939,57	938,28	0,511 003

b) Quantité de matière

Elle caractérise la quantité de matière contenue dans un corps.

Unité S. I. : la mole (mol)

1 mol est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

c) Nombre d'Avogadro N_A (constante d'Avogadro)

Le nombre d'Avogadro N_A constitue le nombre d'entités contenues dans une quantité de matière de 1 mole, donc

$$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$$

Les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

d) Masse molaire M

Elle constitue la masse d'une mole d'atomes ou de molécules, donc de $6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomes ou molécules.

Unité : $1 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

A partir de la masse molaire on peut calculer la masse d'un atome, m_0:

$$\boxed{m_0 = \frac{M}{N_A}}$$

Application : calcul du nombre d'atomes dans un échantillon de masse m :

$$\boxed{N = \frac{m}{m_0} = \frac{mN_A}{M}}$$

e) Unité de masse atomique (1 u)

1 u est la masse correspondant à $\frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de ^{12}C.

12 g de ^{12}C renferment une quantité de matière de 1 mole et se composent donc de $6{,}02\ 10^{23}$ atomes. On obtient :

$$1\text{u} = \frac{1}{12}\frac{M}{N_A} = \frac{1}{12} \cdot \frac{0{,}012\ \text{kg}\,\text{mol}^{-1}}{6{,}02 \cdot 10^{-23}\,\text{mol}^{-1}} = 1{,}661 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$$

f) Isotopes d'un élément chimique

Noyaux d'un même élément chimique, mais renfermant des nombres de neutrons différents.

Exemples : * $^{35}_{17}Cl$ contient 17 protons et 18 neutrons, constitue 75% du chlore naturel;

* $^{37}_{17}Cl$ contient 17 protons, mais 20 neutrons et constitue 25% du chlore naturel.

* $^{238}_{92}U$ (99 % de l'U naturel) et $^{235}_{92}U$ (1% de l'U naturel)

* $^{1}_{1}H$ hydrogène; $^{2}_{1}H$ deutérium; $^{3}_{1}H$ tritium.

2. Lois de conservation

Dans toutes les réactions nucléaires (radioactivité naturelle ou artificielle, bombardement par des particules, fission, fusion,…), un noyau atomique est transformé, on observe que les grandeurs suivantes sont conservées :

- la somme énergie-masse;
- le nombre de nucléons;
- la charge électrique;
- la quantité de mouvement;
- le moment cinétique (grandeur caractérisant l'état de rotation).

3. Défaut de masse

Dans les réactions nucléaires, la masse n'est pas conservée, mais la somme **masse plus équivalent en masse de l'énergie** est conservée.

Le défaut de masse est la différence entre la masse des particules initiales et celle des particules finales.

On doit tenir compte de la masse au repos des particules : $E_0 = m_0 c^2$.

Exemple : **réaction d'annihilation**

1 électron et 1 positron s'annihilent et donnent naissance à deux photons de même énergie partant dans des sens diamétralement opposés.

L'énergie des deux particules est : $2 E_0 = 2 m_0 c^2 = 2 \cdot 511$ keV.

L'énergie de chaque photon est donc 511 keV.

Cette radiation est caractéristique dans les réactions d'annihilation.
(Application : tomographe à positrons)

4. Radioactivité

a) Définition

On appelle radioactivité la transformation de noyaux atomiques au cours desquelles un rayonnement est émis.

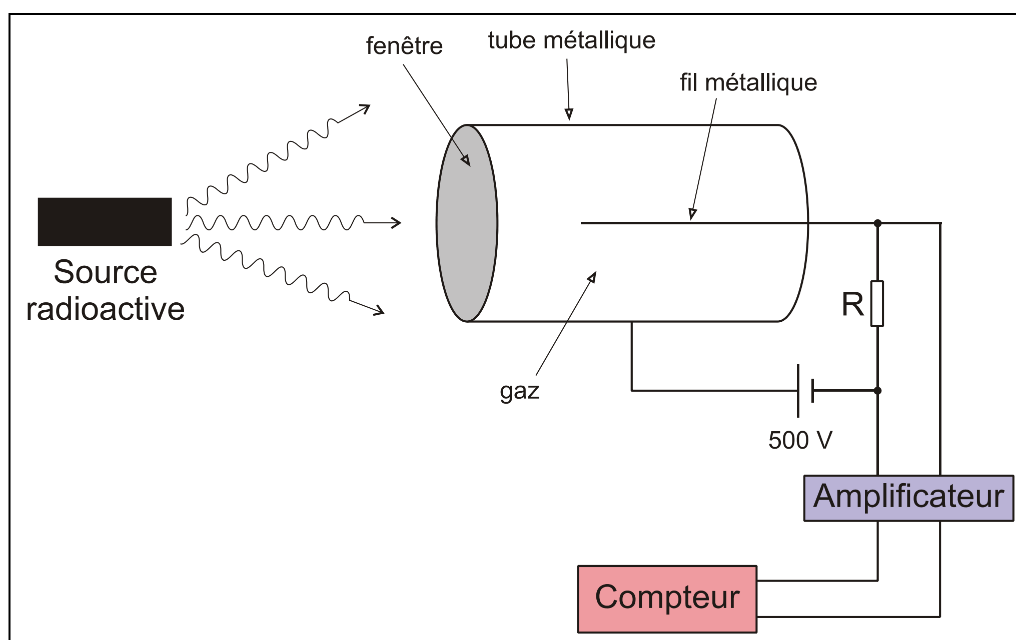
Ces rayonnements sont par exemple

- des rayons gamma (γ) constitués de photons de très grande énergie (très grande fréquence);
- des particules matérielles: rayons alpha, composés de noyaux $^{4}_{2}He$ (ou $^{4}_{2}\alpha$);
  rayons béta, composés d'électrons $^{0}_{-1}e$ (ou $^{0}_{-1}\beta^{-}$) ou de positrons $^{0}_{1}\overline{e}$ (= antiélectrons) ($^{0}_{1}\beta^{+}$);
  neutrons ($^{1}_{0}n$);
  protons ($^{1}_{1}p$).

La **radioactivité naturelle** est celle qui existe naturellement dans la nature.

La **radioactivité artificielle** est celle obtenue par bombardement de noyaux atomiques par des particules (neutrons, protons, particules α, électrons, positrons, …).

b) Détecteur de rayonnement radioactif: le compteur Geiger-Müller



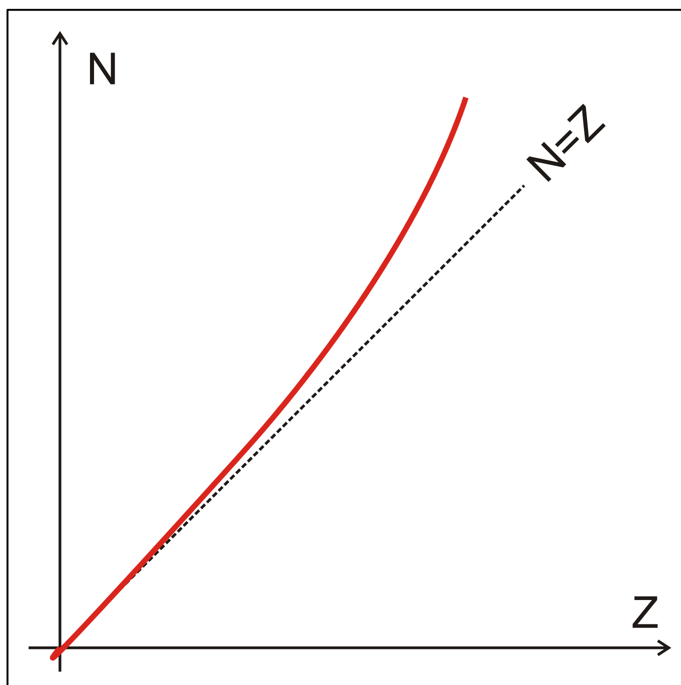
Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet ionisant du rayonnement radioactif. Chaque ionisation à l'intérieur du tube provoquée par le rayonnement fait apparaître un courant électrique de courte durée à travers le gaz et la résistance R. Aux bornes de celle-ci naît alors

une impulsion de tension qui est amplifiée et envoyée vers un hautparleur ("bip-bip") et un compteur d'impulsions.

Malheureusement un compteur Geiger-Müller ne renseigne pas sur la nature et l'énergie des rayonnements.

5. Types de radioactivité

a) Courbe de stabilité

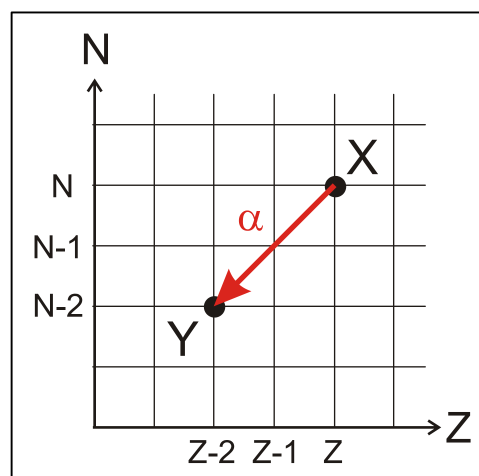


La courbe de stabilité des nucléides (courbe rouge sur le diagramme N-Z) indique l'emplacement approximatif des nucléides stables.

En principe les **noyaux stables** (environ 300) entourent la courbe de près tandis que **les noyaux instables (noyaux radioactifs, radionucléides)** (environ 3000) s'en écartent davantage.

En se **désintégrant**, les **noyaux radioactifs** se rapprochent de la courbe de stabilité par **l'émission de rayonnements radioactifs énergétiques**.

b) Désintégration alpha



Certains radionucléides lourds (N+Z > 200) émettent des particules alpha (ou noyaux d'hélium).

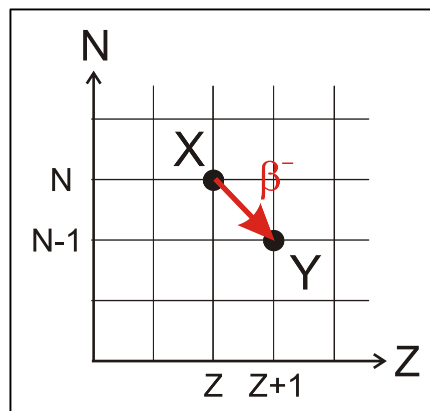
Equation bilan : $^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$

Le nucléide X est appelé "noyau père", le nucléide Y "noyau fils".

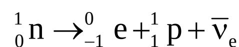
X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Exemple : $^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He$

c) Désintégration β⁻

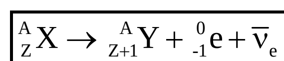


Les radionucléides avec un surplus de neutrons (situés à gauche de la courbe de stabilité) émettent un électron qui provient de la décomposition d'un neutron en un proton et *un antineutrino électronique* suivant l'équation :



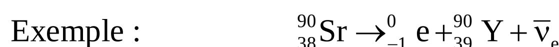
$${}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{-1}^{0}e + {}_{1}^{1}p + \overline{\nu}_e$$

Equation bilan:



$${}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + {}_{-1}^{0}e + \overline{\nu}_e$$

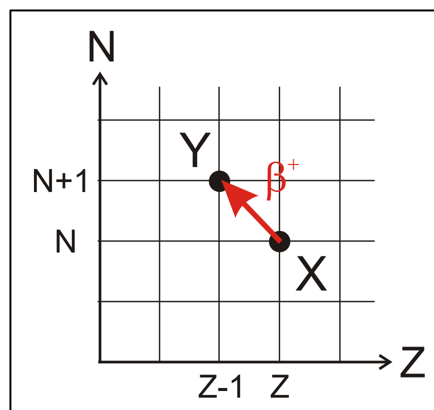
X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.



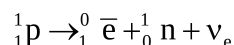
Exemple : $${}_{38}^{90}Sr \rightarrow {}_{-1}^{0}e + {}_{39}^{90}Y + \overline{\nu}_e$$

L'antineutrino garantit la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie.

d) Désintégration β⁺

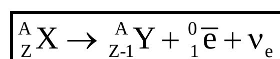


Les radionucléides avec trop de protons (ou trop peu de neutrons, donc situés à droite de la courbe de stabilité) émettent un positron qui provient de la décomposition d'un proton en un positron, un neutron et un *neutrino électronique*:



$${}_{1}^{1}p \rightarrow {}_{1}^{0}\overline{e} + {}_{0}^{1}n + \nu_e$$

Equation-bilan:



$${}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{Z-1}^{A}Y + {}_{1}^{0}\overline{e} + \nu_e$$

X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

La particule notée ${}_{1}^{0}e$ est un positron (ou positon ou antiélectron) : de même masse que l'électron mais de charge opposée.

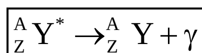


Exemple : $${}_{8}^{14}O \rightarrow {}_{1}^{0}\overline{e} + {}_{7}^{14}N + \nu_e$$

Le neutrino garantit la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie.

e) Désintégration γ

Après une transformation radioactive du noyau, le noyau fils est normalement dans un état excité (*) et se désexcite en émettant un (ou plusieurs) photons de haute énergie (gamma).



$${}_{Z}^{A}Y^{*} \rightarrow {}_{Z}^{A}Y + \gamma$$

f) Remarques

- Toutes les désintégrations sont accompagnées d'une libération d'énergie : cette énergie est contenue dans le rayonnement émis et transférée au corps qui l'absorbe (ionisation de la matière, destruction de liaisons chimiques, échauffement local, ...) !
- Il existe d'autres types de radioactivité : émission de protons, neutrons, …
- Les neutrinos et antineutrinos électroniques sont des particules de charge électrique nulle, de masse au repos très petite, et n'interagissant que très peu avec la matière.

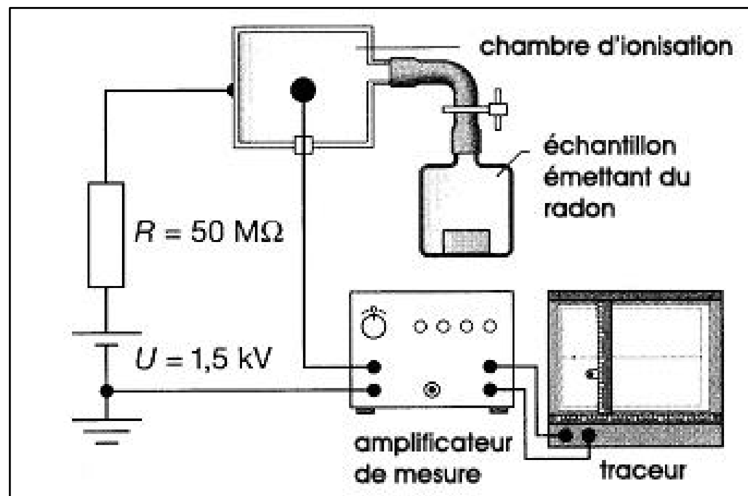
6. Loi de la désintégration radioactive

La désintégration radioactive d'un nucléide est un **phénomène aléatoire** : chaque désintégration est un événement indépendant et on ne peut pas prévoir à quel moment un nucléide donné va subir une désintégration. Lorsqu'un nucléide se désintègre, il est transformé en un autre nucléide, qui peut être radioactif à son tour, ou être stable.

La désintégration d'un nucléide est indépendante des conditions physiques (température, pression, ...) dans lequel il se trouve et de son état chimique (libre ou combiné en molécules).

a) Expérience avec une source de radon

L'isotope ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ du gaz rare radon (appelé encore *thoron*) est un émetteur de particules α. Il est formé lors de la décroissance du thorium. Lorsqu'on injecte une certaine quantité d'air contenant cet isotope du radon dans une chambre à ionisation, on peut mesurer aussitôt un courant d'une certaine intensité traversant la chambre.



On observe que l'intensité de courant décroît d'abord rapidement, ensuite plus lentement. Cette intensité est proportionnelle **au nombre de désintégrations par seconde**.

En analysant la courbe de décroissance, on peut constater qu'après un certain temps T, le nombre de désintégrations par seconde a diminué de moitié. On trouve T = 55s.

b) Loi de décroissance radioactive

Le but est de déterminer l'évolution statistique au cours du temps du nombre de radionucléides **d'un même type** $^{A}_{Z}X$ **donné** (d'un **radioélément** $^{A}_{Z}X$ donné), contenus dans un échantillon.

Condition initiale : A l'instant t = 0, l'échantillon comprend N_0 radionucléides.

A l'instant t, il y en a N.

A l'instant t+dt il n'y en a plus que N+dN < N (dN < 0).

–dN est le **nombre de nucléides qui se désintègrent** au cours de l'intervalle de temps dt.

–dN est d'autant plus grand que :

1. le nombre N de noyaux radioactifs présents est plus grand: $-dN \sim N$
2. la durée dt de l'intervalle de temps est plus grande: $-dN \sim dt$

Par suite : $-dN \sim N\,dt \Leftrightarrow dN = -\lambda\,N\,dt$

$\lambda > 0$ est la **constante de désintégration caractérisant le radioélément ;**

son unité S. I. est 1/s = s^{-1}.

(λ représente la probabilité de désintégration par seconde)

On a donc l'équation différentielle suivante : $\frac{dN}{N} = -\lambda\,dt$

Afin de résoudre cette équation différentielle on détermine la primitive à gauche et à droite du signe d'égalité.

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$

On obtient :

$$\ln N = -\lambda t + C$$

La constante d'intégration C s'obtient à l'aide de la condition initiale.

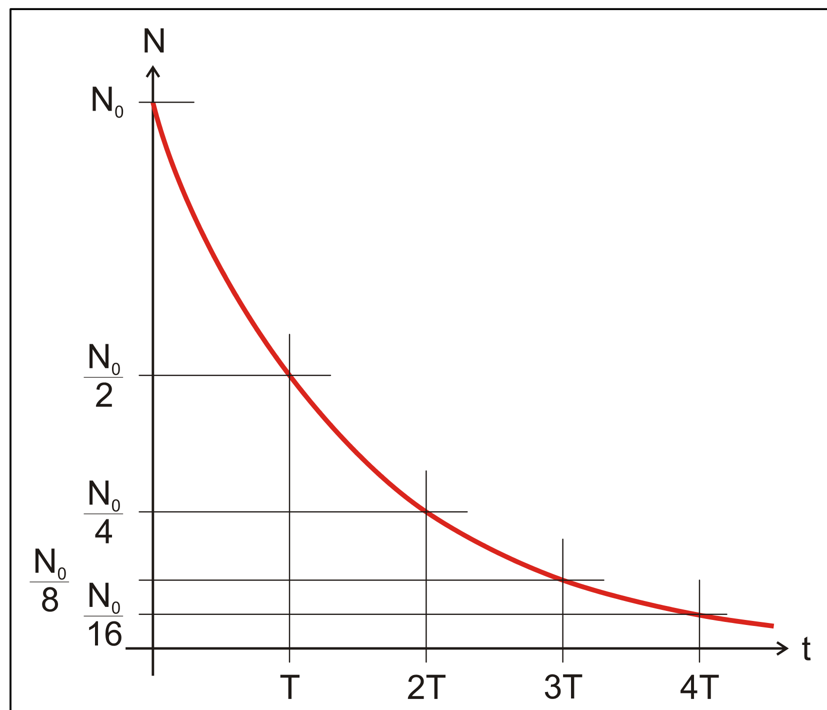
On obtient : $C = \ln N_0$

Finalement :

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$\boxed{N(t) = N_0\ e^{-\lambda t}}$$



c) Demi-vie T d'un radioélément

On appelle demi-vie T d’un radioélément le temps au bout duquel le nombre N a diminué de moitié.

La demi-vie des noyaux radioactifs peut s’étendre de fractions de secondes jusqu’à des milliards d’années. Elle est caractéristique d’un nucléide particulier.

Exemples de quelques demi-vies :

$^{226}_{88}Ra(\alpha)$: T = 1590 a (années) $^{238}_{92}U(\alpha)$: T = $4{,}5 \cdot 10^9$ a

$^{222}_{86}Rn(\alpha)$ T = 3,825 d (jours) $^{40}_{19}K$: T = $1{,}3 \cdot 10^9$ a

neutron (instable) : T = 702 s

proton (stable): T est infini

d) Relation entre T et λ :

En t = T, on a N(T) = $N_0/2$, donc: $N(T) = \frac{N_0}{2} = N_0\, e^{-\lambda T}$

Cette relation fournit : $\boxed{T = \frac{\ln 2}{\lambda}}$ ou : $\boxed{\lambda = \frac{\ln 2}{T}}$

e) Interprétation de l'expérience avec la source de radon

Le nombre de désintégrations par seconde s'écrit

$$-\frac{dN}{dt} = N_0 \lambda e^{-\lambda t} > 0$$

Il décroît suivant la même loi exponentielle que la décroissance radioactive!

Les 55 s représentent donc la demi-vie du radon 220.

Constante de désintégration du radon 220 : $\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{55}\frac{1}{s} = 1{,}26 \cdot 10^{-2}\,\frac{1}{s}$

7. Activité d’une source radioactive

a) Définition

L’activité A d’une source radioactive est le nombre de noyaux radioactifs se désintègrant par seconde.

C'est aussi le nombre de particules ou de photons émis par unité de temps.

Si dans un intervalle de temps dt, –dN nucléides se sont désintégrés, l’activité vaut :

$$\boxed{A = -\frac{dN}{dt}}$$

Unité : 1 becquerel = 1 Bq = 1 s^{-1}

A l’aide de la loi de la désintégration on obtient :

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\boxed{A = \lambda N}$$

En posant $A_0 = \lambda N_0$, on obtient: $\boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$

b) Applications

- **Datation en archéologie :** L’isotope C-14 est radioactif β^- avec une demi-vie de 5730 années. ${}^{14}_{6}C$ est créé dans l’atmosphère par bombardement par rayons cosmiques. Il est ensuite absorbé par les plantes sous forme de dioxyde de carbone. A la mort des plantes, l’absorption cesse et le carbone C-14 se désintègre au cours du temps. L’activité renseigne sur la date de la mort de l’organisme.

  Exemple : Dans un échantillon de carbone prélevé sur une momie, l’activité du C-14 a diminuée à la valeur 60 % de la valeur initiale. Calculer la date de la mort de la personne.

  On a: $A = 0,60 \cdot A_0 = A_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T}}$

  Et: $t = -T \cdot \frac{\ln 0,60}{\ln 2} = 4\,222\,a$

- **Datation en géologie :** Plusieurs éléments radioactifs peuvent être utilisés pour la datation de roches. Nous prenons le cas du plomb. Les isotopes du plomb 206, 207 et 208 proviennent de la désintégration de l’uranium 238, 235 et du thorium.

  Si on connaît le rapport du nombre d’atomes de plomb N’ par rapport au nombre de noyaux d’uranium, on peut calculer la date du début de la désintégration de

l'échantillon. Chaque noyau d'uranium disparu donne lieu après une série de désintégrations à un noyau de plomb.

Soit r le rapport du nombre de noyaux de plomb N' par rapport au nombre de noyaux d'uranium N:

$$r = \frac{N'}{N}$$

Le nombre initial de noyaux d'uranium est :

$$N_0 = N + N' = N + rN = (1 + r)N$$

La loi de désintégration permet d'écrire :

$$N = (1 + r)N \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T}t}$$

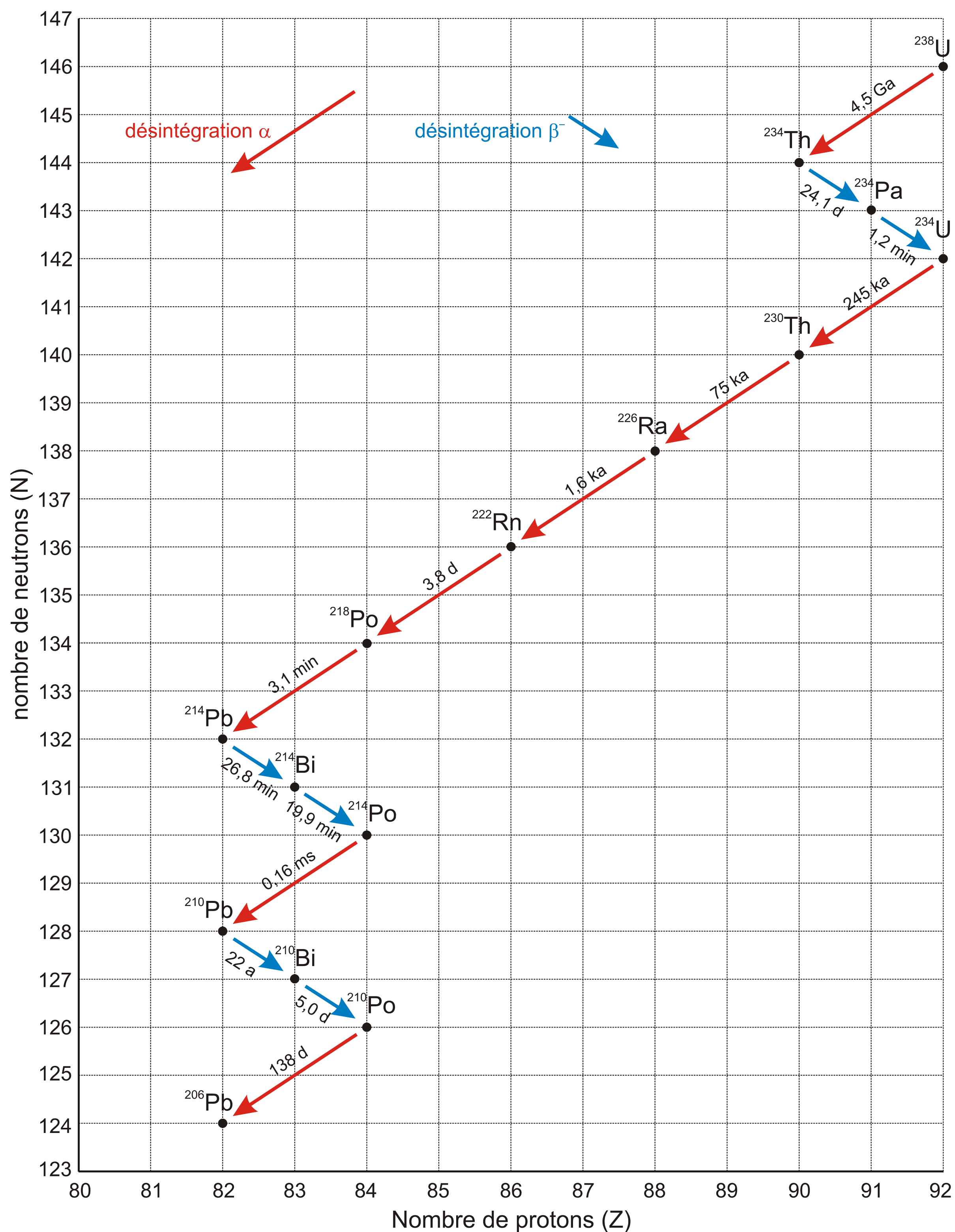
On obtient :

$$t = T\frac{\ln(1 + r)}{\ln 2}$$

Application numérique : $T = 4{,}5\ 10^9$ a. Si on mesure r = 0,8, l'échantillon aura un âge de $3{,}8\ 10^9$ a

8. Radioactivité naturelle

Dans la nature existent trois familles de désintégration radioactive dont voici celle de l'uranium 238. Sont indiquées également les demi-vies des radionucléides qui interviennent.



9. Défaut de masse et énergie de liaison

Les noyaux atomiques doivent leur cohésion à la **force d'interaction forte** entre nucléons. C'est une force d'attraction à courte portée. Elle est de loin plus importante que les forces électriques répulsives.

Défaut de masse : On constate que la somme des masses des A nucléons composant un noyau atomique est toujours supérieure à la masse du noyau ${}^{A}_{Z}X$:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_X > 0$$

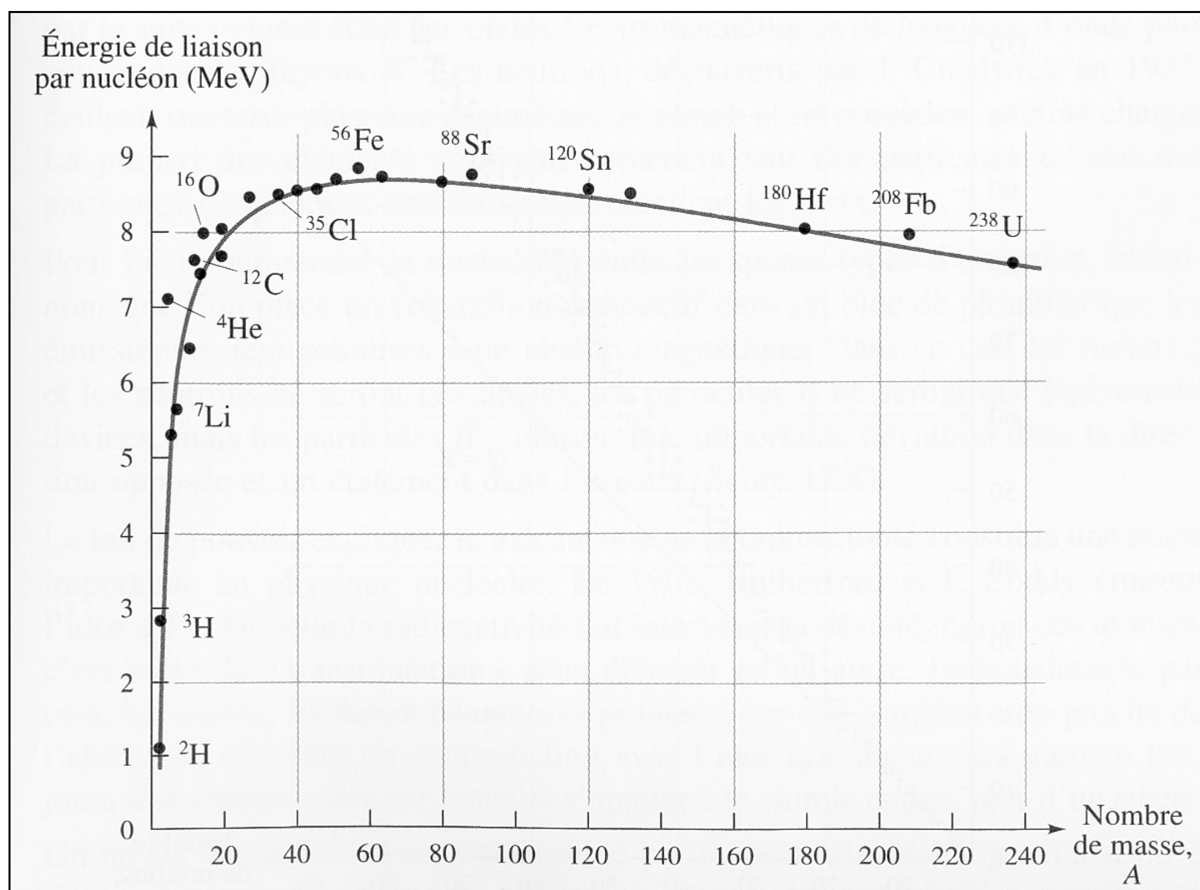
Pour disperser tous les nucléons du noyau, il faut donc fournir au noyau l'énergie $\Delta m \cdot c^2$.

Cette énergie représente **l'énergie de liaison E_L du noyau**:

$$E_L = \Delta m \cdot c^2$$

E_L est aussi l'énergie qui est libérée si on construit un noyau atomique à partir de ses composantes.

Courbe de l'énergie de liaison par nucléon ($\frac{E_L}{A}$):

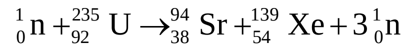


H. Benson 3 Ondes, Optique, Physique Moderne

Conséquence : on peut libérer de l'énergie en cassant des noyaux lourds (fission atomique) ou en construisant un noyau à partir de composantes (fusion).

10. Fission nucléaire

Exemple de fission nucléaire : un neutron lent peut s'introduire dans un noyau d'uranium-235 et y rester. Le noyau excité se scinde en deux fragments suivant une multitude de possibilités dont l'une est :



$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{38}^{94}Sr + {}_{54}^{139}Xe + 3\,{}_{0}^{1}n $$

Les neutrons sortant de cette réaction sont des neutrons rapides et peuvent donner lieu à une fission nucléaire si on les ralentit (neutrons thermiques).

L'énergie libérée est :

$$ \Delta E = E_{réactifs} - E_{produits} = [(m_U + m_n) - (m_{Xe} + m_{Sr} + 3m_n)]c^2 $$

Application numérique :

m(U-235) = 234,9935 u; *m(Xe-139) = 138,8892 u;*

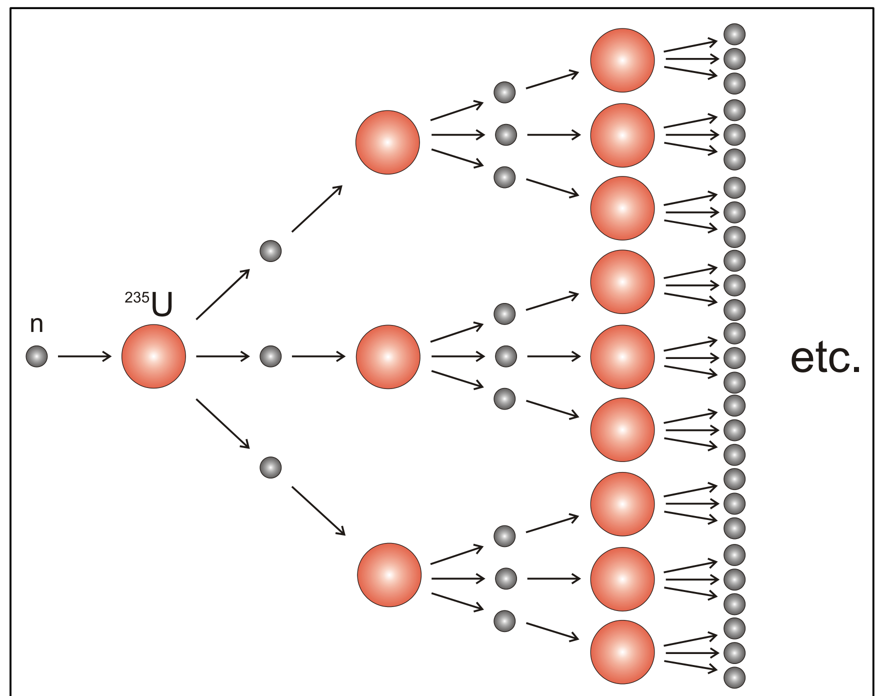
m(Sr-94) = 93,8945 u; *m(n) = 1,0087 u,*

Le défaut de masse Δm = 0,1924 u et l'énergie libérée lors de la réaction (pour un noyau d'uranium-235) vaut $E = \Delta m \cdot c^2$ = 179 MeV.

Ainsi 1 kg d'U-235 peut libérer par fission une énergie de $4{,}59 \cdot 10^{26}$ MeV = $73{,}5 \cdot 10^{12}$ J. (Lors de la combustion, 1 kg d'essence libère une énergie de $47{,}3 \cdot 10^{6}$ J)

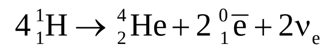
11. Réaction en chaîne

Lorsqu'on est en présence d'un nombre de noyaux U-235 assez important, les 2 ou 3 neutrons libérés dans la réaction précédente peuvent donner lieu à 2 ou 3 nouvelles fission de U-235 et ainsi de suite. Il s'ensuit une réaction en chaîne où le nombre de fissions augmente rapidement en fonction du temps.



12. Fusion nucléaire

* L’énergie solaire a pour origine la fusion de l’hydrogène selon le **cycle de Bethe** dont le bilan est :



$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{1}\overline{\mathrm{e}} + 2\nu_{e}$$

L’énergie libérée est :

$$\Delta E = E_{\text{réactifs}} - E_{\text{produits}} = [4m_p - (m_{He} + 2m_e)]c^2$$

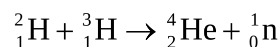
Application numérique:

$m_p = 938{,}27\ MeV/c^2$; $m_{He} = 3727{,}4\ MeV/c^2$; $m_e = 0{,}511\ MeV/c^2$: $\Delta E = 24{,}7\ MeV$

Lors de la fusion nucléaire (pour 4 noyaux d’hydrogène) la réaction libère donc une énergie de 24,7 MeV, à savoir une énergie de 6,2 MeV par noyau d’hydrogène.

Ainsi 1 kg d’hydrogène peut libérer une énergie de $37{,}1\cdot10^{26}$ MeV respectivement $594\cdot10^{12}$ J

* Dans les **réacteurs de fusion thermonucléaires** (JET, ITER) la recherche porte sur la réaction suivante :



$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Le nucléide ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, appelé encore **deutérium** (noté D), est un isotope de l’hydrogène que l’on retrouve dans la nature à raison de 0,012 %.

Le nucléide ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, appelé encore **tritium** (noté T), est produit artificiellement à partir du deutérium dans le réacteur même ($D + D \rightarrow T + p$).

Le problème actuel de cette recherche est le fait que la température doit être supérieure à 10^8 K (agitation thermique énorme !) afin que les particules puissent surmonter leur répulsion électrique. À de telles températures, les atomes sont complètement ionisés (c.-à-d., ils ont cédés tous leurs électrons) : leur état est appelé **plasma**.

Dans la **bombe H**, cette température est atteinte en utilisant une bombe à fission comme détonateur.